

Characteristic Analysis of Voltage Stability Improvement and Power Factor Correction by STATCOM.

朴志庸* · 朴德義* · 韓炳文**

(Ji-Yong Park · Duk-Hee Park · Byung-Moon Han)

Abstract - This paper describes simulation and experimental results to analyze the dynamic characteristics of STATCOM, which is connected to the ac system for compensating the power factor and improving the voltage stability. The simulation and experimental results confirm that the scaled model for STATCOM can properly compensate the power factor of the load and regulate the bus voltage at the common connection point.

Key Words : FACTS (flexible alternating current transmission systems), STATCOM (static synchronous compensator) EMTP (electromagnetic transients program)

1. 서론

FACTS 기기는 초창기 수동소자와 싸이리스터 스위치를 이용한 방식으로 시도되었으나 최근 전력용 반도체 기술이 획기적으로 발달하면서 전압원인버터방식으로 연구가 활발히 추진되고 있다[1].

인버터식 FACTS 기기로 현재 상용화 단계에 있는 것이 STATCOM이다[2,3,4]. STATCOM은 전력계통의 전압안정도를 증대시키고 부하나 선로에서 발생하는 무효전력을 연속적으로 제어하는 기능을 한다. 소용량 STATCOM은 변조율과 점호각을 조절하여 출력전압의 크기와 위상을 제어하는 반면 대용량 STATCOM은 점호각만 조절하여 출력전압의 크기와 위상을 제어한다. 따라서 대용량의 경우 전·지상 상태전이시 응답이 느린 반면 출력파형의 고조파 발생이 낮은 장점을 갖는다.

배전계통에서의 STATCOM에 대한 동특성 분석에 대해서는 참고문헌 [5]에 기술되어 있으나 논문의 저자가 산업체에 소속되어 있는 관계로 그 구체적인 결과는 제시되어 있지 않다. 본 논문에서는 소용량 STATCOM이 차후 국내배전계통에 적용될 것을 고려하여 계통과 STATCOM의 상호응동을 분석하는데 역점을 두었다. STATCOM의 인버터는 PWM으로 동작하나 점호각만 조절하는 것으로 하여 시뮬레이션과 축소모형실험을 통해 전압안정도향상과 역률보상을

분석하였다. 시뮬레이션은 EMTP를 사용하였으며 축소모형에는 2KVA PWM 인버터를 이용하고, 제어 알고리즘은 마이크로프로세서 80C196KC로 구현하였다.

2. STATCOM 동작원리

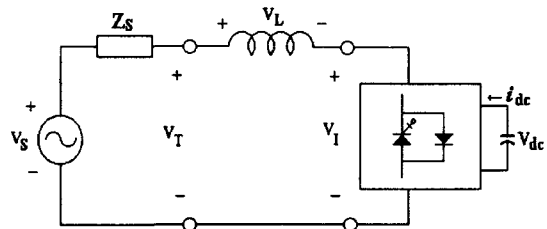


그림 1 STATCOM의 단상등가회로

Fig. 1 Single-phase equivalent circuit of STATCOM

STATCOM과 교류계통 사이에 교환되는 무효전력의 양은 인버터 출력전압의 크기에 따라 정해진다. 그림 1은 STATCOM이 교류계통에 연결된 것을 가상하여 보상기에서 들여다 본 테브난 단상등가회로를 나타낸 것이다.

인버터와 교류계통 사이의 유·무효전력 교환은 인버터 출력전압, 교류단자전압, 양단의 위상차에 의해 제어 가능하다. 만일 인버터출력전압 V_1 와 교류단자전압 V_T 가 동일한 위상각을 갖고 $V_1 < V_T$ 이면, 교류계통은 보상기에 무효전력을 공급하고, $V_1 > V_T$ 이면 교류계통은 보상기로부터 무효전력을 공급받는다. 그리고 $V_1 = V_T$ 이면 무효전력의 출입은 0이 된다. 또한 인버터출력전압이 교류단자전압보다 진상이면 보

* 準 會 員 : 明知大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 明知大 電氣情報制御工學部 副教授

接受日字 : 1999年 8月 26日

最終完了 : 1999年 11月 16日

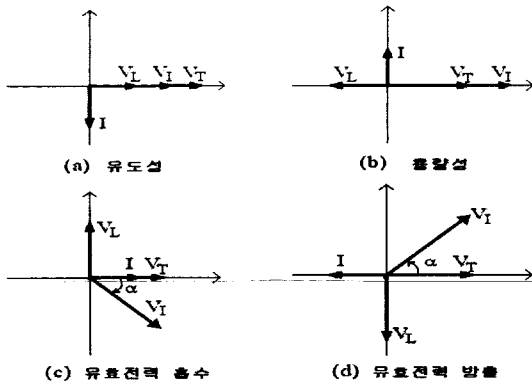


그림 2 STATCOM의 벡터선도
Fig. 2 Vector diagram of STATCOM operation

상기는 유효전력을 교류계통에 공급하고 이때 직류캐패시터에 저장된 에너지가 계통으로 방출되며, 인버터출력전압이 교류단자전압에 대해 지상이면 교류계통으로부터 유효전력을 흡수하여 직류캐패시터에 에너지를 저장한다.

이상적으로는 무효전력을 제어할 때 인버터의 출력전압은 교류단자전압과 동상이다. 그러나 실제 보상기에서는 인버터의 스위칭손실과 변압기권선의 저항손실을 보상하기 위해 교류단자전압과 인버터출력전압 사이에는 약간의 위상차를 유지해 손실에 해당하는 유효전력을 연속적으로 보상해야 한다. 또한 진상에서 지상으로, 지상에서 진상으로 상태전환을 할 때도 위상차를 조절하여 동작한다.

그림 2는 보상기의 동작을 설명하는 벡터선도로 인버터출력전압 V_i , 교류단자전압 V_T , 리액턴스전압 V_L , 선로전류 I , 그리고 위상각 α 의 관계를 나타낸 것이다. 그림 2(a)와 2(b)는 V_i 와 V_T 가 동상으로 보상기가 유도성과 용량성 무효전력을 공급하는 경우를 나타낸 것이다. 그림 2(c)와 2(d)는 V_i 와 V_T 가 위상각 $\pm\alpha$ 를 갖고 유효전력을 교류계통으로부터 흡수 또는 공급하는 것을 보이고 있다. 보상기가 유도성에서 용량성으로 천이할 경우 그림 2(a) 상태에서 그림 2(c) 상태를 거쳐 그림 2(b) 상태로 되고, 용량성에서 유도성으로 천이할 경우 그림 2(b) 상태에서 그림 2(d) 상태를 거쳐 그림 2(a) 상태로 된다.

3. 전압안정도개선 원리

그림 3은 전압안정도개선의 원리를 설명하기 위한 간단한 교류계통도이다. E 는 공급모선전압을 나타내며 V 는 부하모선전압 즉 안정화를 도모하는 대상전압이다. 두 모선 사이는 등가임피던스 $Z_S = R_S + jX_S$ 로 나타내었고 부하는 어드미턴스 Y_L 로 나타내었으며 보상기는 제어대상 모선에 병렬로 연결되어 있다. 공급모선과 부하모선 사이의 전압을 ΔV 라 하면 이 ΔV 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta V = E - V = Z_S I_L \quad (1)$$

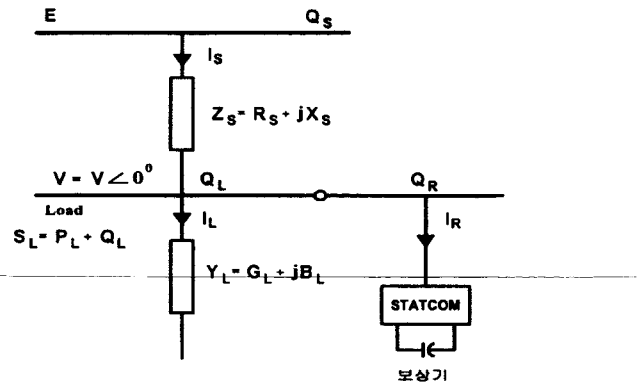


그림 3 전압안정도개선 기능을 설명하기 위한 간단한 계통도
Fig. 3 System diagram for voltage stability improvement

복소전력을 나타내는 식 (2)로부터 I_L 을 구하면 식 (3)과 같으며 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 실수부와 허수부로 나타내면 ΔV 는 식 (4)와 같다.

$$S = VI^*, S^* = V^* I \quad (2)$$

$$I_L = \frac{P_L + jQ_L}{V} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= (R_S + jX_S) \frac{(P_L + jQ_L)}{V} \\ &= \frac{(R_S P_L - X_S Q_L)}{V} + j \frac{(X_S P_L + R_S Q_L)}{V} \quad (4) \\ &= \Delta V_R + \Delta V_X \end{aligned}$$

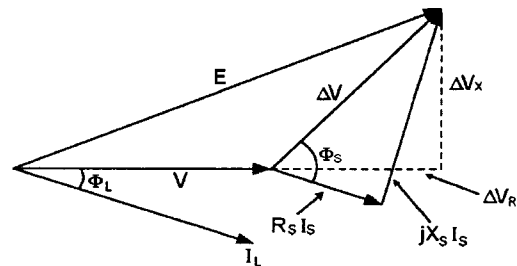


그림 4 STATCOM이 없을 때 벡터도
Fig. 4 Vector diagram without STATCOM

또한 그림 4에 의하면 모선전압 E 로 부터 등가 임피던스 Z_S 에 의한 전압강하 ΔV 만큼 감해진 것이 V 임을 알 수 있고, ΔV 는 식 (5)로 다시 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = I_S R_S + jI_S X_S \quad (5)$$

여기서, $V = V \angle 0^\circ$ 는 기준벡터이다.

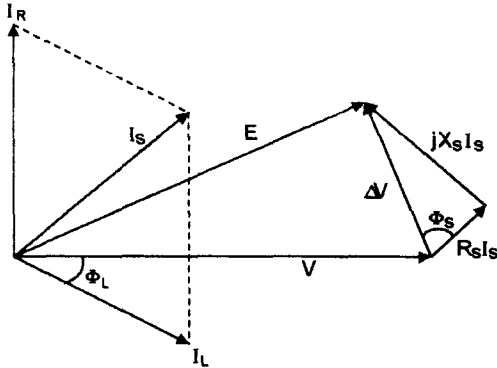


그림 5 STATCOM이 있을 때 벡터도
Fig. 5 Vector diagram with STATCOM

보상기가 없을 경우 $I_S = I_L$ 이므로 ΔV 는 선로전류 I_S 와 부하전류 I_L 은 방향이 같음을 알 수 있다. 전압안정도를 개선하기 위해 보상기를 부가한 경우 보상기전류를 I_R 이라고 하면 다음 식이 성립한다.

$$I_S = I_L + I_R \quad (6)$$

그림 5는 보상기가 부가 되었을 경우 벡터선도를 나타낸 것이다. 부하가 일정한 상태에서 I_L 의 크기와 위상각이 고정되어 있다고 하면, 전압안정도를 개선하기 위해 보상기를 부가함으로써 보상기전류 I_R 의 크기를 조절하여 I_S 의 위상각을 변화시킬 수 있다.

따라서 식 (5)에 의해 ΔV 의 크기와 위상각이 변하는데 이는 ΔV 를 조절함으로써 부하모션에서도 모션전압 E 와 크기가 동일한 일정전압 V 를 유지하여 전압안정도를 개선 가능함을 알 수 있다. 그러나 E 와 V 사이의 위상차는 점점 커지게 된다.

4. 역률보상 원리

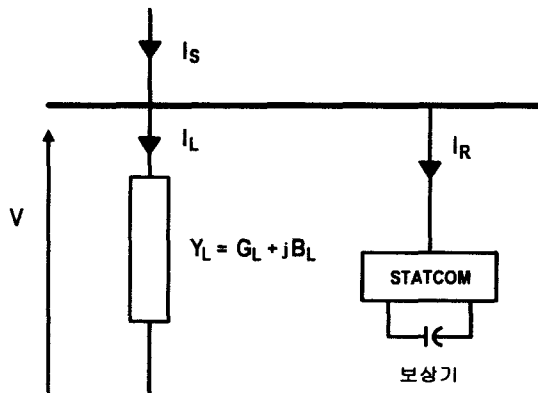


그림 6 역률보상 기능을 설명하기 위한 간단한 계통도
Fig. 6 System diagram for power factor correction

역률보상의 원리를 설명하기 위한 간단한 교류계통도를 그림 6에 나타내었다. 부하모션의 역률을 개선하기 위해 보상기를 병렬로 부가하였다. 부하전류 I_L 은 식 (7)과 같고 실수부 I_R 과 허수부 I_X 의 성분으로 표현된다.

$$I_L = V(G_L + jB_L) = VG_L + jVB_L = I_R + jI_X \quad (7)$$

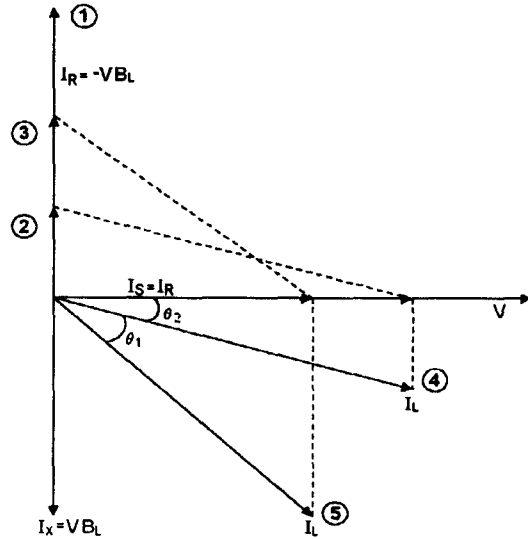


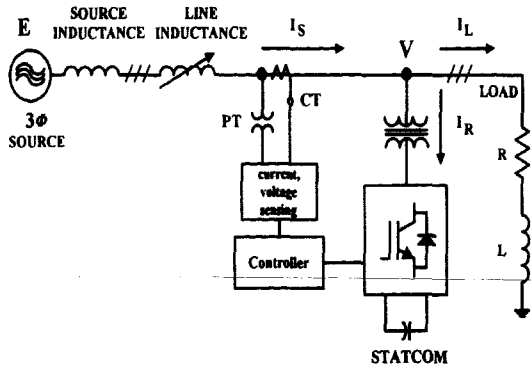
그림 7 역률보상 기능의 벡터도
Fig. 7 Vector diagram for power factor correction

그림 7은 역률보상의 원리를 나타낸 벡터도로 선로전류 I_S 와 부하모션전압 V 의 위상이 동상이 되도록 제어됨을 알 수 있다. 이 때 부하는 유도성으로 지상전류가 흐르는 것으로 가정하였다. 따라서 보상기의 전류는 용량성으로 전상전류가 되어야 효과적인 보상이 가능함을 알 수 있다. 어떠한 부하상태에서 부하전류 I_L 의 크기와 방향이 ⑤와 같이 정해졌다고 하면 보상기전류 I_R 벡터의 크기와 방향이 ③과 같을 때 전압 V 와 전류 I_S 가 동상을 유지할 수 있게 된다.

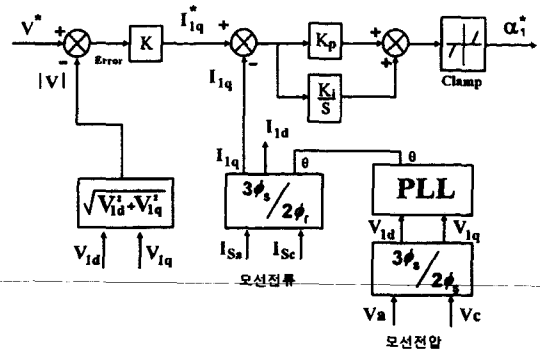
또한 이 상태에서 I_R 을 ①과 ② 같이 크기를 조절하면 선로전류 I_S 를 진·지상으로 변화 가능함을 알 수 있다. 결국 보상기전류 I_R 의 크기를 제어함으로써 역률보상이 가능함을 알 수 있다. 여기서는 부하모션이 지상전류를 야기할 경우만을 예로 설명하고 있지만 전상일 경우도 보상기를 유도성으로 동작시킴으로써 역시 역률제어가 가능함을 알 수 있다.

5. EMTF 시뮬레이션

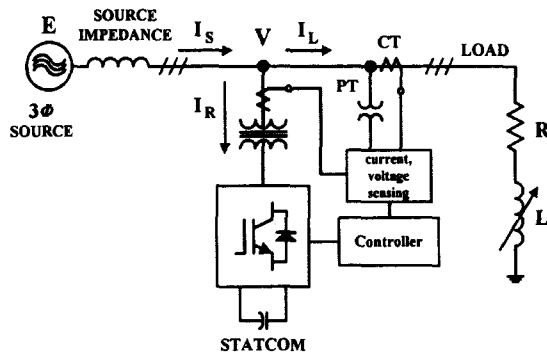
STATCOM의 전압안정도개선과 역률보상시 동작특성 및 제어기의 성능 해석을 위하여 EMTF를 이용하여 그림 8과 같이 시뮬레이션 모형을 설계, 모델링하였다.



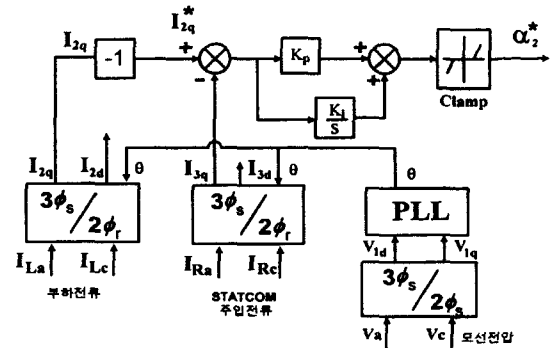
(a) 전압안정도개전시



(a) 전압안정도개전시



(b) 역률보상시



(b) 역률보상시

그림 9 STATCOM 제어블럭도
Fig. 9 STATCOM control block

그림 8 시뮬레이션 주회로
Fig. 8 Main circuit for simulation

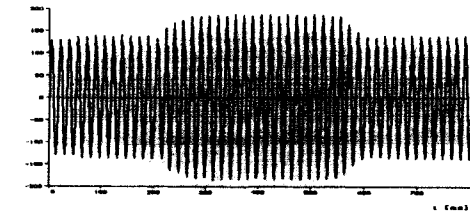
표 1 시뮬레이션 회로정수
Table 1 Parameter of simulation model

모선 전압 (L-L)	220[V]
모선 주파수	60[Hz]
인버터 스위칭 주파수	3[KHz]
선로 인덕턴스	40[mH]
부하 역률	0.8
부하 (R, L)	24[Ω], 47.74[mH]

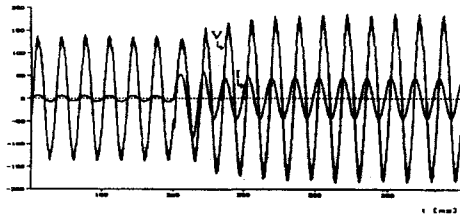
시뮬레이션 모형은 축소모형 실험과 비교하기 위해 3상 220V, 2KVA로 구성하였으며 시뮬레이션 모형에 사용된 회로정수는 표 1에 나타나 있다.

그림 9는 STATCOM의 전압안정도개선과 역률보상시의 제어블럭도를 나타낸다. 3상 전력을 효과적으로 제어하기 위해 동기속도로 회전하는 모선전압벡터 |V|에 d축을 설정한다. 또한 d축과 수직인 위치에 q축을 설정하여 정지좌표상에서 제어대상인 전류의 3상 변수를 이 동기좌표 상에서

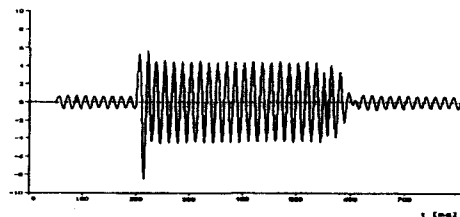
2상 변수로 변환하면 d축 성분 전류 i_d 는 순간유효전류와 관계하고 q축 성분전류 i_q 는 순간무효전류와 관계된다. 여기서 전류의 무효분인 i_q 를 제어함으로써 전압안정도개선과 역률보상을 도모할수 있다. 그림 9(a)에서 |V|는 계산된 모선전압크기이며 모선전압기준치 V^* 와 비교된 후 무효전류기준치 i_{1q}^* 를 형성한다. 이러한 i_{1q}^* 는 모선전류 I_s 의 무효분 i_{1q} 와 비교되어 그 차는 PI 전류제어기를 거쳐 인버터 출력전압의 점호각 α_1 을 형성한다. 이러한 점호각 α 에 의해 STATCOM이 인버터 출력전압을 형성, 무효전류 I_R 을 모선으로 공급, 또는 흡수한다. 결국 I_R 에 의해 Closed-loop 제어대상인 I_s 가 조절되므로 기준모선전압 V가 안정화된다. 한편, 그림 9(b)의 무효전류 i_{2q} 는 그림 8(b)에서 볼수 있듯이 STATCOM 모선전압 V에 대한 부하전류 I_L 의 무효분이다. STATCOM이 지상의 부하역률을 개선하기 위해서는 부하전류의 무효분 i_{2q} 와 크기는 같고 부하가 반대인 무효분의 전류 $-i_{2q}$ 를 공급하여야 한다. 따라서, $-i_{2q}$ 는 i_{2q}^* 가 된다. 역시 i_{2q}^* 와 STATCOM 주입전류의 무효분 i_{3q} 가 비교된 후 그 차는 PI 전류제어기를 거쳐 인버터출력전



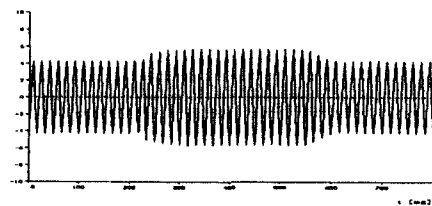
(a) STATCOM의 전압안정도개선 파형



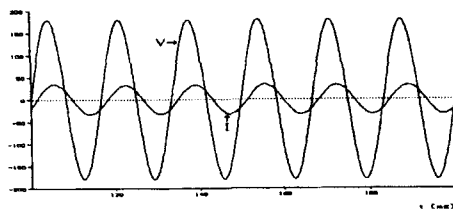
(b) 모선전압과 STATCOM 보상전류 파형



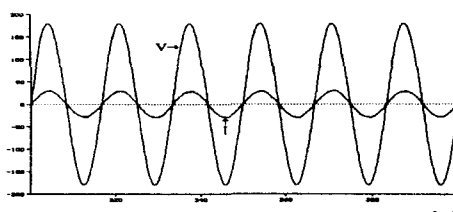
(c) STATCOM 보상 무효전류 파형



(d) 모선전류 파형



(e) 역률보상 전 전압과 전류



(f) 역률보상 후 전압과 전류 파형

그림 10 시뮬레이션 결과
Fig. 10 Simulation results

압의 점호각 α_2^* 를 형성한다. 따라서 부하전류의 무효분을 STATCOM의 무효전류로 보상함으로써 모선단의 역률을 1로 할 수 있다. 그림 10은 이러한 회로정수와 제어블록도를 근거로 EMTP 시뮬레이션한 결과파형을 나타낸다.

시뮬레이션은 전압안정도개선과 역률보상으로 나누어 행하였고, 시뮬레이션 시간과 동작시간은 같으며, 전체 시뮬레이션 시간은 0.8s이다. 시뮬레이션내용은 다음과 같다. 처음 50ms동안 STATCOM은 선로와 분리되어 있으며 동작을 하지 않는다. 50ms~200ms동안은 STATCOM이 선로에 투입은 되어 있으나 선로로 무효전류를 공급하지 않는 상태이며, 200ms~550ms 사이에서는 STATCOM이 모선으로 무효전류를 공급하여 전압안정도개선 동작 또는 역률보상 동작을 수행한다. 550ms~800ms동안은 보상전과 동일한 대기상태로 전환한다. 시뮬레이션 결과는 그림 10에 나타나 있다. 그림 10(a)는 STATCOM의 기준모선전압파형을 나타낸다. STATCOM이 동작하지 않을 때 기준모선전압이 선로 인덕턴스에 의해 전원전압(상전압피크치: 180V, L-L: 220V)의 70%의 크기로 강하되어 있으나 전압안정도개선 동작시 원래의 크기로 회복되는 것을 확인할 수 있다.

그림 10(b)는그림 10(a)에서 STATCOM 투입시 주입되는 무효전류 I_R 과 그에 따른 모선전압파형을 확대한 것이다. STATCOM이 신속하게 무효전류를 주입하여 모선전압을 안정화하는 것을 볼 수 있다. 참고로 이 그림에서 전류는 10배 확대한 파형이다. 그림 10(c)와 (d)는 전압안정도개선 동작시 STATCOM의 주입무효전류 I_R 과 모선전류 I_S 를 나타낸다. 그림 10(e)와 (f)는 STATCOM의 역률보상 시뮬레이션 결과이며, 각각 역률보상 동작 전과 후의 모선전압과 전류를 나타낸다. 보상 전 약 36.8° 정도 지상이던 모선전류가 보상 후에 모선전압과 동상이 됨을 알 수 있다. 이 그림에서 전류는 5배 확대한 파형이다.

6. 축소모형 실험

하드웨어 축소모형은 소용량 STATCOM을 감안하여 3상 220V 2KVA로 하였고 인버터의 스위칭 소자로는 Dual IGBT를 이용하였으며 출력파형은 변조율을 고정한 상태에

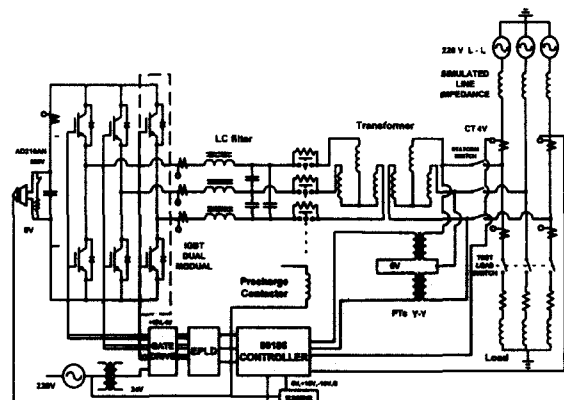


그림 11 축소모형 전체 회로도
Fig. 11 Whole circuit diagram of scaled model

서 PWM 방식으로 동작시켰다. 시스템의 제어장치로는 마이크로프로세서 80C196KC를 사용하였다. 인버터출력전압의 정확한 점도각조절을 위해 계통전압의 영교차점을 검출하여 80C196KC의 외부 인터럽트로 사용하여 인버터 출력 PWM의 동작시점에 사용하였다. 그리고 PWM방식은 기존의 일반적인 기준사인파에 캐리어를 비교하는 PWM방법보다 그 성능이 우수한 3고조파 주입방식의 PWM변조법을 사용하였다. 3고조파 주입방식은 기준사인파에 그 크기가 1/6배인 3고조파를 합하여 이를 캐리어와 비교하는 방식이다. 이 방식으로 사용한 결과 정현파 PWM 방식보다 출력 전압, 전류의 파형이 보다 더 개선됨을 알 수 있었다. 스위칭 주파수는 실제 시스템의 스위칭주파수를 감안하여 3KHz로 하였다. 그림 11은 STATCOM의 하드웨어 축소모형의 전체 회로도이며 표 2는 축소모형의 주요 회로정수이다.

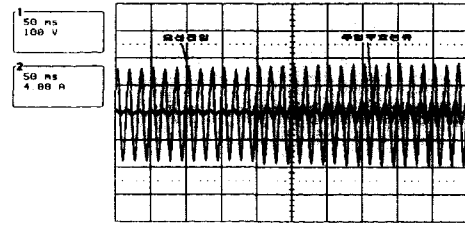
표 2 축소모형 주요 회로정수
Table 1 Parameter of scaled model

모선 전압 (L-L)	220[V]
모선 주파수	60[Hz]
인버터 스위칭 주파수	3[KHz]
선로 인덕턴스	40[mH]
결합 변압기 용량	2[KVA]
DC 캐패시터 용량	900[V], 1100[uF]
Dual IGBT 용량	600[V], 50[A]
부하 역률	0.81
부하 (R, L)	20[Ω], 37.5[mH]

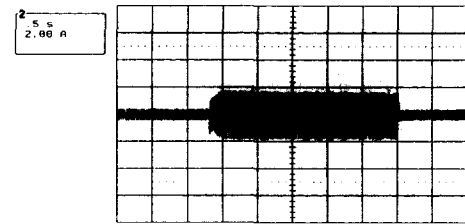
축소모형실험 역시 STATCOM의 전압안정도개선실험과 역률보상실험으로 나누어 행하였으며 그 결과가 그림 12에 나타나 있다. 그림 12(a)는 전압 안정도 개선실험을 하기 위해 STATCOM의 전원단에 40mH의 선로모형 리액터를 삽입하여 약 10V의 상전압강하 ΔV를 발생시켰을 때의 기준 모선전압파형과 STATCOM을 모선에 일정시간 투입시켜 이러한 선로리액터스에 의한 전압강하를 보상시킨 모선전압 파형을 나타낸다. STATCOM 투입시 모선전압강하 10V를 즉각적으로 보상하여 선로모형의 전원단 상전압 피크치인 180V를 유지함을 볼 수 있다. 실험결과 축소모형 STATCOM-M은 변압기와 필터의 히스테리시스에 의한 관성과 손실 때문에 PI 제어계수설정에 어려움이 있으며 따라서 모드 변화시에 약간의 지연이 있는 것을 알 수 있다.



(a) STATCOM의 전압안정도개선 파형



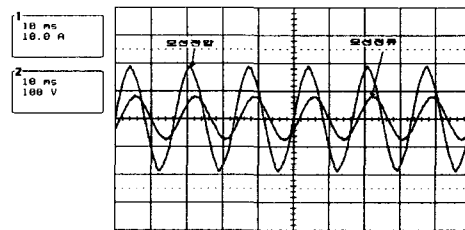
(b) 모선전압과 STATCOM 보상전류 파형



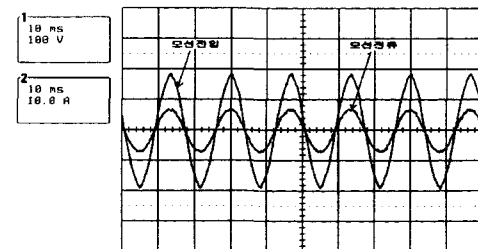
(c) STATCOM 보상 무효전류 파형



(d) 모선전류 파형



(e) 역률보상 전 모선전압과 전류파형



(f) 역률보상 후 모선전압과 전류파형

그림 12 축소모형 실험결과

Fig. 12 Experimental results of scaled model

그림 12(b)는 그림 12(a)의 기준모션전압 V 와 STATCOM의 보상무효전류 I_R 을 확대한 파형인데, 신속하게 무효전류를 공급하여 모션전압을 안정화하는 것을 볼 수 있다.

그림 12(c),(d)는 STATCOM이 전압안정동작을 수행할 때의 보상무효전류 I_R 과 모션전류 I_S 파형을 나타낸다.

그림 12(e)부터의 파형은 장치를 역률개선을 위해 구성하고 콘트롤러를 역률보상모드로 변경한 다음 실험한 결과이다. 그림 12(e)는 부하역률 0.81일 때 보상전의 모션전압과 전류 파형이며, 그림 12(f)는 STATCOM을 투입한 후 역률 1로 보상한 파형이다.

7. 결 론

배전계통에서의 STATCOM에 대한 동특성은 미국과 일본에서 제작사의 실증시험을 통해 분석되고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 이와 관련된 내용이 실린 IEEE 논문을 살펴보면 저자가 미국과 일본의 산업체에 소속되어 있는 관계로 그 구체적인 분석결과는 제시하고 있지 않다.

본 논문에서는 STATCOM이 차후 국내배전계통 적용될 것을 고려하여 배전계통에서의 STATCOM의 동특성을 분석하는데 역점을 두었다. 동특성을 분석하기 위해서 EMTP를 이용한 시뮬레이션을 수행하였고, 축소모형을 제작하여 기본동작과 제어기의 동작을 검증하고 이 축소모형이 부하의 역률을 보상하고 모션의 전압을 조정하는 기능을 실험적으로 확인하고 그 결과를 기술하였다.

실험 결과에 의하면 본 논문에서 고안된 전압조정 알고리즘과 역률보상 알고리즘이 효과적으로 동작함을 확인할 수 있었으며, 특히 보상기의 동특성이 매우 양호함을 알 수 있었다.

본 연구는 과학기술부 엔지니어링 사업 (과제번호 97-NE-25-01-A-04) 지원으로 수행된 연구내용의 일부임.

참 고 문 헌

[1] N. G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE SPECTRUM April, 1993, pp. 40-45.
 [2] C. W. Edward, et al, "Advanced Static Var Generator employing GTO Thyristors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, NO. 4, Oct. 1988, pp. 1622-1627.
 [3] S. Mori, et al., "Development of A Large Static Var Generator using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability", IEEE PES Winter Meeting, Paper No. 92-WM165-1PWRS, Jan. 26-30, 1992.

[4] C. Schauder, et. al., "Operation of 100MVar TVA STATCON", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997.
 [5] E. Larsen, et. al., "Benefits of GTO-based Compensation Systems for Electric Utility Application", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992.
 [6] 한 병문, 박 중근, "EMTP에 의한 STATCON과 송전계통의 동적응동 분석", 대한전기학회논문지, 제46권 7호, pp. 991-997. 1997. 7.

저 자 소 개



박 지 용 (朴 志 庸)

1973년 11월 16일 생. 1998년 명지대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

E-mail: landragon@hanmail.net



박 덕 희 (朴 德 羲)

1973년 2월 9일 생. 1998년 명지대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

E-mail: pdh@nownuri.net



한 병 문 (韓 炳 文)

1953년 7월 5일 생. 1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 미 Westinghouse 중앙연구소 선임

연구원. 현재 명지대 전기정보제어공학부 부교수.

Tel : (0335) 330-6366

E-mail: erichan@wh.myongji.ac.kr